

## S-310JA-2 で観測された VLF ヒスの特性

松尾敏郎\*・木村磐根\*・鎌田哲夫\*\*

### Characteristics of VLF Hiss Observed by S-310JA-2 Rocket

Toshio MATSUO\*, Iwane KIMURA\* and Tetsuo KAMADA\*\*

**Abstract:** VLF hiss was observed on the S-310JA-2 rocket at Syowa Station in the Antarctic region (69°00'S, 39°35'E) at 03 22 LT on February 10, 1977, during polar magnetic storm ( $\Delta H$ ,  $-680 \gamma$ ). This hiss was observed only with a 2.4 m tip-to-tip electric dipole antenna, not observed with a ferrite core loop antenna, and exhibited a sharp lower cut-off frequency which seemed to be associated with lower-hybrid resonance (LHR) in the vicinity of rocket, if we assume the ion composition and electron density, at the observing altitude. Therefore it may be the first rocket observation of LHR hiss. We also obtained altitude profiles of sheath impedance and 7 kHz hiss strength.

**旨要:** VLF帯(0.2~10kHz)電波観測器を搭載したS-310JA-2号機によりVLFヒスが観測された。このヒスは磁界( $H$ )センサーでは観測されず、電界( $E$ )センサーのみに観測され、しかもその下限のカットオフがシャープで、かつその周波数がロケット近傍のLHR周波数と一致すると推定されることから、このヒスはLHRヒスと考えられ、もしそうだとするとロケット観測では初めての観測である。ヒスの7kHz成分の強度とシースインピーダンスの高度プロファイルも得られた。

### 1. は じ め に

極域で飛しょう体でのみ観測されるヒスのうちその下限のカットオフが明らかなものとして 1) V-shaped ヒス, 2) VLF ソーサー, 3) LHR ヒスを掲げることができる。Injun 5 衛星の観測によると 1) は電磁波であり (MOSIER, 1971), 2) は  $H$  成分よりも  $E$  成分の比が大変大きいことから波の wave normal が resonance cone angle に近づく静電的な電磁波と考えられている (MOIER and GURNETT, 1969). 3) は  $E$  センサーのみに観測され、その下限のカットオフ周波数が衛星の緯度、高度とともに変わり、衛星の局所的な LHR 周波数に一致する (BRICE and SMITH, 1965). S-310JA-2 号機で観測されたヒスはカットオフの明らかなヒスであった。

\* 京都大学工学部電気工学第二教室. Department of Electrical Engineering II, Faculty of Engineering, Kyoto University, Yoshida-Honmachi, Sakyo-ku, Kyoto 606

\*\* 名古屋大学空電研究所 Research Institute of Atmospherics, Nagoya University, Toyokawa 442

## 2. 実 験

1977 年 2 月 10 日, 03 時 22 分 (LT) に VLF, HF 帯電波観測器, 電子密度, 電子温度, 電子フラックス測定器等を搭載した S-310JA-2 号機が昭和基地 ( $66.7^{\circ}\text{S}$ ,  $72.5^{\circ}\text{E}$ ; Geomagnetic) から磁力線方向に発射され, 電子密度測定器など一部を除いて実験は成功した. 発射時は極域嵐 ( $\Delta H$ ;  $-680\gamma$ ) の最中で, 地上観測 (VLF, リオメーター, 地磁気, 垂直打ち上げ等) と同時観測がなされた. ロケット搭載の VLF 電波観測器のブロック図を図 1 に示した. VLF 電波, プラズマ信号の  $E$  成分の観測は tip-to-tip 2.4 m で BeCu のリボンによる円筒形ダイポールアンテナが, また,  $H$  成分の観測としてフェライトコア形ループアンテナ ( $1\text{ cm}\phi$ ,  $15\text{ cm}$  長コア, 16000 ターン) が用いられた. これらのアンテナの出力は  $0.2\text{--}10\text{ kHz}$  のバンド幅を有する低周波増幅器, AGC 増幅器を通した後, 広帯域テレメーター (WBTM) で伝送された.  $E, H$  の成分はそれぞれ 10 秒, 5 秒間の時分割で伝送され, WBTM の他に  $10\text{ kHz}$  のバンド内の信号の包絡線強度も対数圧縮されて伝送された. また, ダイポールアンテナには 15 秒ごとに一秒間だけ  $7\text{ kHz}$  の正弦波が印加され, 周波数マーカーにすると同時にシースインプीडダンスを測定するのに用いられた.

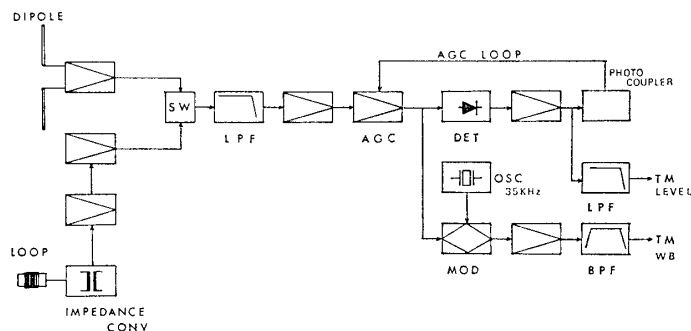


図 1 S-310JA-2 号機に搭載された VLF 電波観測器のブロック図

Fig 1. Block diagram of VLF receiver on board S-310JA-2

## 3. 観測結果と考察

図 2 は観測された全飛しょう中の VLF スペクトルである. 高度  $150\text{ km}$  以降のループ側で突然黒くなっている部分は,  $H$  成分が同時搭載の他の機器からの干渉をうけ, 黒くマスクされたものである. ループアンテナも含めたループ系の周波数特性を考慮しても, ダイポール系に観測されているヒスはループ系では見当たらない. 一方, ダイポールアンテナによる  $E$  成分は上昇高度  $150\text{ km}$  付近から  $210\text{ km}$  近くまでと, 下降時  $211\text{ km}$  から  $150\text{ km}$  近くまでヒスが観測され, 約  $5\text{--}6\text{ kHz}$  以上の上側に観測された. このヒスは下限のカットオフが明

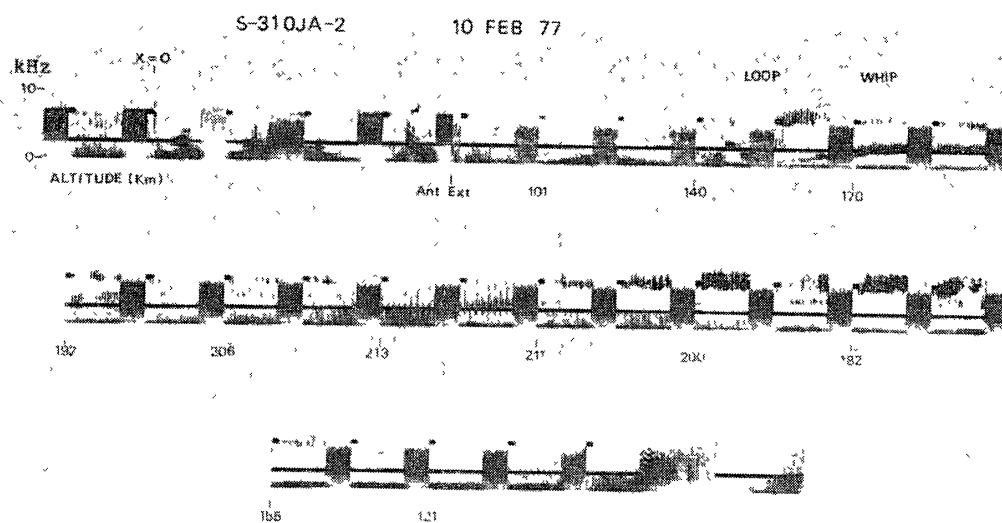


図 2 S-310JA-2 号機で観測された VLF スペクトル

Fig. 2 VLF spectrum observed by S-310JA-2

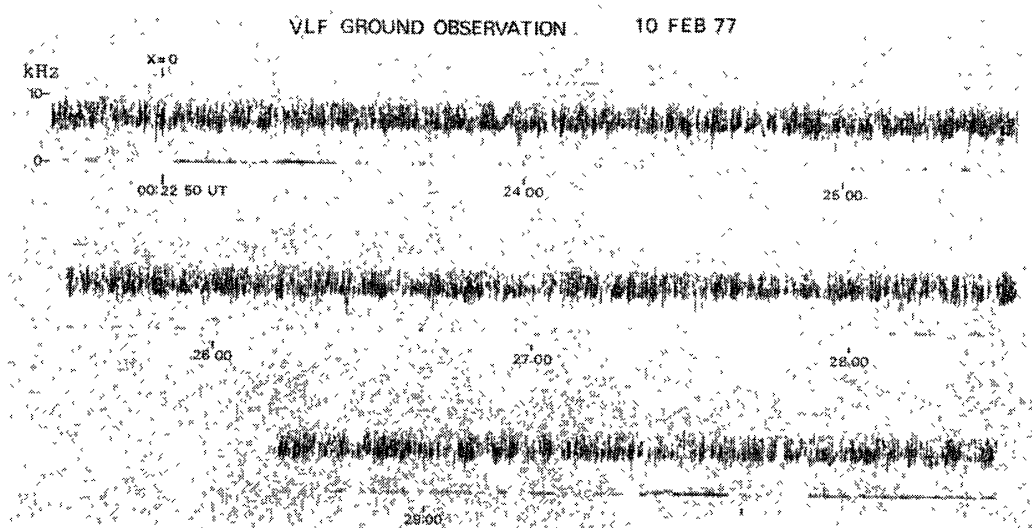


図 3 地上で観測された VLF スペクトル

Fig. 3 VLF spectrum observed on the ground

ちから高度とともに変化している。極域で下限のカットオフが明らかな波動現象として前述のように V-shaped ヒス, VLF ノーサー, LHR ヒスを掲げることができる。S-310JA-2 号機で観測されたヒスは V-shaped ヒスが電磁波であるのに対して, 静電的ふるまいを示すことから後二者のいずれかである。VLF ソーサーは衛星高度が約 1000 km 以下では観測されず, 背景の電子密度が  $100 \text{ cm}^{-3}$  以下の所で発生する (JAMES, 1976) ことを考慮すると, ロケットで観測されたヒスは LHR ヒスの可能性がある。

同時に観測された地上の VLF スペクトル (図 3) をみると, ヒスと考えられる部分はまったくみられず空電ばかりであった. ロケット発射時は強い極域嵐の最中であり, 降下粒子により電離層が電離され, 強い吸収 (30 MHz cosmic noise absorption;  $-3$  dB) をもたらしたため地上では, ヒスが観測されなかった可能性もある. しかし, ロケットで観測されたヒスのスペクトルが LHR ヒスと似ており, しかも  $E$  成分のみで  $H$  成分には観測されていないことから LHR ヒスと考えられる.

そこで, もしこの波動現象を LHR ヒスとすれば, 地上では観測されなくて当然である. また, LHR ヒスとすればその下限の周波数は, 式 (1) で与えられる  $f_{\text{LHR}}$  に一致しなければならない (前田, 木村 1970).

$$\frac{1}{f_{\text{LHR}}^2} \cdot \frac{1}{M_{\text{ieff}}} = \frac{1}{f_{\text{po}}^2} + \frac{1}{f_{\text{He}}^2} \quad (1)$$

電離層のイオンの組成は,  $\text{O}_2^+$ ,  $\text{NO}^+$ ,  $\text{O}^+$ ,  $\text{He}^+$ ,  $\text{H}^+$  からなると考えられるが, ヒスの観測された 150–210 km の高度では,  $\text{O}_2^+$ ,  $\text{NO}^+$ ,  $\text{O}^+$  の三種のイオンを考慮すればよい. したがって  $X(\text{O}_2^+)$ ,  $X(\text{NO}^+)$ ,  $X(\text{O}^+)$  をそれぞれのイオンの電子密度に対する相対密度とすると,

$$X(\text{O}_2^+) + X(\text{NO}^+) + X(\text{O}^+) = 1 \quad (2)$$

となる. イオンの実効平均質量 ( $M_{\text{ieff}}$ ) は,

$$\frac{1}{M_{\text{ieff}}} = \frac{X(\text{O}_2^+)}{32} + \frac{X(\text{NO}^+)}{30} + \frac{X(\text{O}^+)}{16} \quad (3)$$

である. ロケット発射時は極域嵐の最中で,  $\Delta H$  は  $-680 \gamma$  の変化をし substorm 時であった. また, 日の出直後の発射で, オーロラは観測できなかったが, オーロラが昭和基地上空に出現していたことは十分考えられる. 北極のオーロラ帯でのロケット観測 (SWIDER and NARCISI, 1977; JHONSON *et al.*, 1958) で得られたオーロラ中のイオン密度から, イオンの実効平均質量を求めたのが図 4 の実線である. これらは真夜中のデータであり, 我々の S-310JA-2 号機の実験は, 午前 3 時 22 分 (LT) であることを

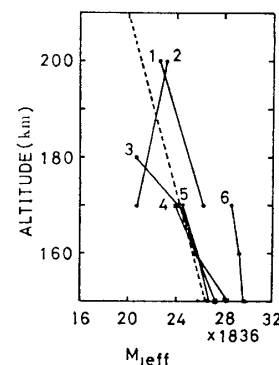


図 4 夜間の極域における  $\text{O}^+$ ,  $\text{NO}^+$ ,  $\text{O}_2^+$  に対するイオンの実効平均質量の高度プロファイル (1, 2, 3, 4, 5: 地磁気じょう乱時, 6: 静穏時)

Fig 4 Altitude profile of the effective mean mass number for  $\text{O}^+$ ,  $\text{NO}^+$ ,  $\text{O}_2^+$  in the nighttime polar region (1, 2, 3, 4, 5 disturbed, 6 undisturbed)

1, 2 JOHNSON *et al.*, 1958

3, 4, 5 SWIDER and NARCISI, 1977

6 ZHLODKO and KLYUEVA, 1970

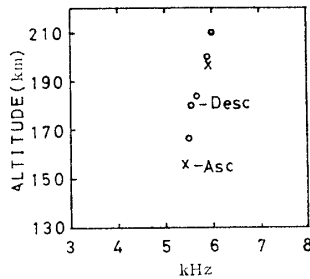


図 5 LHR ヒスの低域遮断周波数の高度プロファイル

Fig 5 Altitude profile of the lower cut-off frequency for LHR hiss

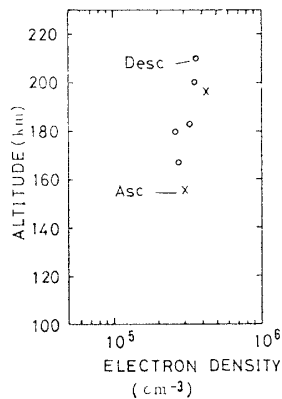


図 6 観測された LHR 周波数により推定された電子密度の高度プロファイル

Fig 6 Altitude profile of electron density deduced from the observed LHR frequency

考慮して、以下では図 4 の破線のような特性を用いて電子密度の推定を行う。電子のサイクロトロン周波数 ( $f_{He}$ ) はタイポール磁場からではなく、球関数展開によるものから計算する。観測された  $f_{LHR}$  (図 5) の値と電子のサイクロトロン周波数  $f_{He}$  の計算値を用いると、式 (1) により電子のプラズマ周波数 ( $f_{pe}$ )、すなわち電子密度 ( $N_e$ ) は図 6 に示すようなプロファイルとなる。

このロケット実験では残念ながら電子密度測定器が不調で、また、同時観測の地上からのアイオノグラムも極嵐の最中でフラックアウト (小川, private communication) となり、上記の図 6 の値を確かめるすべもないが、極地のじょう乱時の  $\Delta H$  と CNA の大きさから、両者ともに大きいほど電子密度が高い (小川他, 1977) ので妥当な値と考えられる。

次に 7 kHz の正弦波をタイポールアンテナに印加し、周波数マーカーを作るととも

に、観測された 7 kHz の強度を測定して、アンテナのシースインプータンスの高度プロファイルを示したのが図 7 である。7 kHz の校正信号のレベルを基準にして観測されたヒスの 7 kHz 成分について、その電界強度の高度プロファイルを電子のフラックスの強度を重ねて図示したのが図 8 である。電界強度の値はロケットの姿勢が不明なことから、スピン、プリセッションの影響が入ったままの値である。上昇時の 160 km 付近を除いて高い高度の方が、強度が強い傾向を示している。上昇時と下降時の比較では下降時の方が強かった。

このロケットでは同時に 100 eV–10 keV (久保他, 1979), および数 10 keV–数 100 keV の非熱的電子の観測が行われ、1 keV 以上のフラックスは 7 kHz のヒスの強度の高度プロファイルと逆相関で、上昇時の方が下降時よりも強い。しかし図 8 に示したように、740 eV 以下では正の相関がみられ、もしこのヒスが非熱的粒子と関係があるとすれば、数 100 eV 以下の低

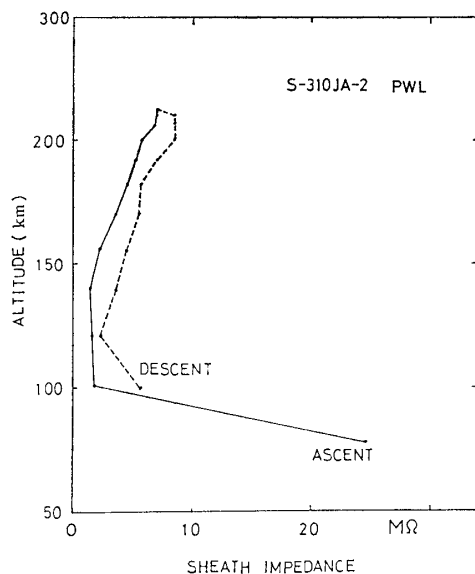


図7 シースインピータンスの高度プロファイル

Fig. 7. Altitude profile of sheath impedance

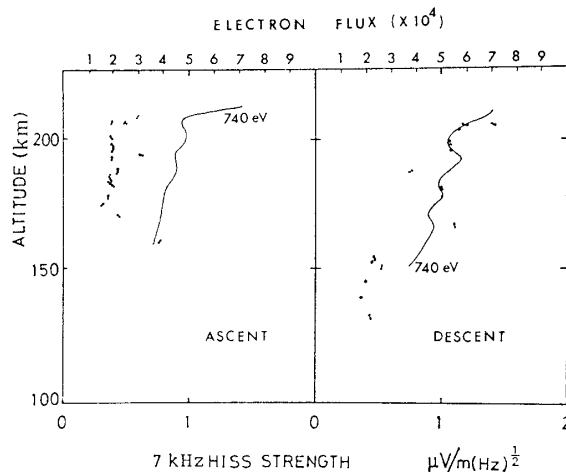


図8 LHR ヒスの 7 kHz 成分の強度と電子フラックスの高度プロファイル

Fig. 8. Altitude profile of 7 kHz LHR hiss strength and electron fluxes.

エネルギーのものとなるであろう。

LHR ヒスの発生機構として、1) LHR ダクトによる trapping (SMITH *et al*, 1966), 2) low energy 電子による LHR 不安定 (HORITA and WATANABE, 1969), 3) 飛しょう体自身による励起、などが考えられている。LHR ヒスの発生しやすい緯度は、不変地磁気緯度で  $45^{\circ}$ – $58^{\circ}$  および  $68^{\circ}$ – $70^{\circ}$  にある (中村他, 1976) ことを考えると、3) は特定の緯度を説明しにくい。また、2) については、 $68^{\circ}$ – $70^{\circ}$  のような極域では low エネルギー粒子の降下も多いことから、2) の可能性があるが、中緯度側での説明がしにくいので、1) の可能性が強い。図8に示した LHR ヒス強度の高度プロファイルが高度の高くなるに従い、強くなる傾向にあることは、この放射の発生機構を考える場合のヒントになるであろう。また、人工衛星では LHR ヒスの緯度的な変化は測定できるが、高度的変化は観測できない。

#### 4. あとがき

本報告ではまったくふれなかったが、図2のダイポール側のスペクトルで、約 140 km (上昇時)–160 km (下降時) の間に 1–4 kHz のスペクトルがみられるが、これは静電的波動と考えられる。このタイプの波動は、同様に昭和基地で発射された S-310JA-1, S-210JA-20, 21 号機でも観測されているが、その発生機構は別なものと考えられる (KIMURA *et al*, 1978)。今回の南極ロケット実験のように、波動と粒子の相互作用をテーマにした実験は、内之浦でも

行われ、波動励起の考察がなされている (MATSUMOTO *et al.*, 1974).

## 謝 辞

このロケット実験は、国立極地研究所の特別事業として行われたものである。実際の昭和基地でのロケット打ち上げオペレーションおよび地上観測は、18次隊（楠宏隊長，国分征副隊長）の多くの隊員の方々のご苦勞によって成功したもので、ここに心から感謝の意を表します。同時搭載の電子フラックス測定器 (ESL) のデータは、東京大学宇宙航空研究所，久保治也氏に、またロケット発射時のイオノグラムのデータは、電波研究所から頂いた。あわせて謝意を表します。

## 文 献

- BRICE, N M and SMITH, R L (1965) Lower hybrid resonance emissions J. Geophys Res, **70**, 71-80
- HORITA, R E and WATANABE, T. (1969) Electrostatic waves in the ionosphere excited around in the lower hybrid resonance frequency Planet. Space Sci, **17**, 61-74.
- JAMES, H. G (1976), VLF saucers J Geophys Res, **81**, 501-514.
- JOHNSON, C Y, MEADOWS, E B and HOLMES, J C (1958) Ion composition of the arctic ionosphere J Geophys Res, **63**, 443-444
- KIMURA, I, YAMAGISHI, H, MATSUO, T and KAMADA, T (1978). S-310JA-1 rocket observation of VLF emission spectra at Syowa Station in Antarctica Mem Natl Inst Polar Res, Spec Issue, **9**, 51-68
- 久保治也・村田節夫・伊藤富造・国分 征 (1979) S-310JA-2号機による降下電子の観測 南極資料 **63**, 17-28
- 前田憲一・木村磐根 (1970) 電磁波動論 東京，オーム社，117 p.
- MATSUMOTO, H, MIYATAKE, S and KIMURA, I. (1974). Frequency spectra of VLF plasma waves observed by Japanese ionospheric sounding rocket K-9M-41. Rep. Ionos. Space Res. Jpn, **28**, 89-109.
- MOSIER, S R (1971) Poynting flux studies of hiss with the Injun 5 satellite J Geophys Res, **76**, 1713-1728
- MOSIER, S R and GURNETT, D A (1969) VLF measurements of the poynting flux along the geomagnetic field with the Injun 5 satellite J. Geophys Res, **74**, 5675-5687
- 中村義勝・恩藤忠典・丸橋勝美・村上利光 (1976): VLF ヒスによる プラズマポーズ近傍のイオン組成. 電波研究所季報, **118**, 123-134
- 小川忠彦・森 弘隆・宮崎 茂 (1977) 第17次南極ロケット観測で得られた電子密度・温度プロフィール. 第62回日本地球電気磁気学会講演予稿集, I-83
- SWIDER, W and NARCISI, R S (1977) Auroral E-region: Ion composition and nitric oxide Planet Space Sci, **25**, 103-116
- SMITH, R L, KIMURA, I, VIGENERON, J. and KATSUFRAKIS, J (1966). Lower-hybrid-resonance noise and a new ionospheric duct. J Geophys. Res, **71**, 1925-1927.
- ZHLOODKO, A D and KLYUEVA, N M (1970): Ion composition of the polar ionosphere Space Res, **10**, 746-750.

(1978年6月10日受理)